

新工科牵引下大学物理实验课程改革与实践

秦平力 余雪里 马良

(武汉工程大学数理学院, 湖北 武汉 430205)

摘要 工程素养的培养离不开“大学物理实验”等自然科学课程的支撑。在大学物理实验教学过程中,开展“课内+课外”“课堂+现场”“线上+线下”“平时+期末”在内的系列课程改革,突出实验创新,形成以“理论知识内化、实验能力提升、工程素养培养”为目标,以“教学内容重构、平台建设创新、评价体系完善”为载体,以“提升教师教学创新意识和能力”为支撑,以“融合现代化信息技术”为手段的“四位一体”课程改革思路,建构“理论课堂-实验实践-大赛创新”协同育人模式,提升工科生的工程素养,夯实新时代一流专业建设和工程教育专业认证的基石。

关键词 新工科;大学物理实验;工程素养;创新能力;“双线”混融

CURRICULUM REFORM AND PRACTICE OF UNIVERSITY PHYSICS EXPERIMENT UNDER THE TRACTION OF EMERGING ENGINEERING

QIN Pingli YU Xueli MA Liang

(School of Mathematics and Physics, Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei 430205)

Abstract Engineering-literacy cultivation is inseparable from the support of natural science courses such as College Physics Experiment. During the teaching process of College Physics Experiment, series of curriculum reform, such as “In+After-class” “Classroom+on-site” “On+Off-line” and “Peacetime+Final”, were carried out. The experimental innovation was highlighted to form “Four-in-One” curriculum reform ideal with “internalize theoretical knowledge, improve experimental ability and cultivate engineering literacy” as a goal, “teaching content reconstruction, platform construction innovation and evaluation system improvement” as a carrier, “enhancing teachers’ teaching innovation consciousness and ability” as a support and “fusion of modern information technology” as a means, to construct the collaborative education mode of “theory classroom-experiment practice-competition innovation” for the improved engineering-students’ engineering-literacy, which can consolidate the foundation of first-class specialty construction and engineering education specialty certification in the new era.

Key words emerging engineering; university physics experiment; engineering competence; innovation ability; “double line” mixed-syncretization

收稿日期: 2022-08-29

基金项目: 湖北省高校省级教学改革研究项目(2022304), 武汉工程大学研究生教育教学改革研究项目(2022JYXM01, 2022ZDXM08), 武汉工程大学教学科研研究项目(X202047, X2017004)。

作者简介: 秦平力, 男, 教授, 主要从事大学物理实验教学, 研究方向是光学功能材料与光伏器件研究, qinpingli2008@163.com。

引文格式: 秦平力, 余雪里, 马良. 新工科牵引下大学物理实验课程改革与实践[J]. 物理与工程, 2023, 33(2): 73-80.

Cite this article: QIN P L, YU X L, ZHANG Y, MA L. Curriculum reform and practice of university physics experiment under the traction of Emerging Engineering[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(2): 73-80. (in Chinese)

2017 年被称为“新工科”元年,复旦共识、天大行动、北京指南在半年间陆续形成,奏响了我国新工科教育改革的序曲^[1-3]。2019 年 4 月 29 日,教育部“六卓越一拔尖”计划 2.0 大会中提出“立足新时代,大力发展新工科、新农科,提升新内涵,强化质量效果,建设高水平本科教育”的目标^[4]。新工科建设一方面要求高等教育应该授人以渔,另一方面要求培养综合创新型人才。目前,我国正在实施“创新驱动发展”“中国制造 2025”“一带一路”等重大战略,高新技术产业对高等教育提出了新要求。在这一背景下,地方院校要根据上述国家战略需求,创新思维方式^[5],倡导学科交叉、专业融合,跨界整合,在知识传承的基础上,注重培养学生的深度学习能力、系统分析能力、交叉融合能力和创造创新能力^[6],以及具有较强行业背景知识和工程实践能力,能够胜任行业技术与社会发展需求的应用型工程技术人才。

我校是以“化工”为主要特色的一所工科院校,按照“立足湖北,辐射全国,服务化工行业和区域经济社会发展”的办学定位以及不断深化以“三实一创”(实训、实验、实习、创新)为核心的“两型两化”(创新型、复合型、工程化、国际化)的人才培养模式改革。《大学物理实验》是面向理、工科开设的必修通识课。学生的工程知识、工程思维、工程设计、工程实践、工程创造和工程管理等工程素养的培养离不开《大学物理实验》等课程的支撑。

为适应新形势下应用型人才培养的需求,很多学校打破大学物理实验原有教学传统,不断地尝试新教学模式^[7,8],中国科学技术大学以培养学生能力为核心,建立多层次物理实验课程体系和多元化教学模式^[9];浙江农业大学建立基于 MOOCs 的“网络课程+面授+课后讨论”物理实验教学模式,以达到充分利用学生碎片化学习时间,丰富实验教学手段,提升学生的实验兴趣^[10];湖北汽车工业学院利用创新创业教育理念探索大学物理实验教学规律^[11];天津理工大学和中国民航大学以学科特色为抓手,构建以学习者为中心,开启应用型工程能力培养为目的,不断探索,初步形成了具有自身特色的工科基础物理教学模式^[12],在教学方法、教学内容和考核方式等方面进行了革新,并取得了不错的成效。东南大学和

上海交通大学以在线开放实验课程为抓手,对课程资源进行改进,增加了小动画、改进了实验操作微视频、开发了与课程内容相应的虚拟仿真实验,开展预备性物理实验,加强中学物理基础到大学物理课程的衔接,激发了他们对物理知识的学习兴趣^[13,14],提高了科学文化素质,培养了科学实践精神。

1 工程素养和创新能力培养过程面临的问题

目前,大学物理实验教学提升学生的工程素养和创新能力过程中,面临诸多困境,主要表现在三个方面:首先,物理理论性较强,在“3+1+2”新的高考改革背景下,部分学生在高中阶段没有选学物理,而选学物理的学生也未进行全方位物理实验技能训练,且实验教学停留在“纸”或“黑板”上,导致工程素养培养目标达成度低;其次,教学内容、方法及评价体系等与“新工科”脱节,导致知识点与工程实际问题难结合;最后,课前因预习不充分,难以理清物理原理,产生畏难情绪;课中又过分依赖教师,缺乏主动学习意识;课后则对知识体系一知半解,导致创新能力不足。

2 课程改革与实践

针对上述问题,不断探索与实践,形成以“理论知识内化、实验能力提升、工程素养发展”为目标,以“教学内容重构、平台建设创新、评价体系完善”为载体,以“提升教师教学创新意识和能力”为支撑,以“融合现代化信息技术”为手段的“四位一体”课程改革思路(见图 1),不断地开展“课内+课外”“课堂+现场”“线上+线下”和“平时+期末”在内的系列课程改革。

2.1 课程体系重构

1) “分块、分类、分阶”组建第一课堂

根据学校学季制的要求,在大学物理理论课分成为力学、电磁、光学、热学与近代四个模块的基础上,将实验课分工科、理科和文管三类;根据内容难易,再分为基础、综合、设计与创新“四阶”,组建第一课堂^[15]。

以仿真实验、毕业设计、科技活动、各类竞赛等为第二课堂(见图 2)。

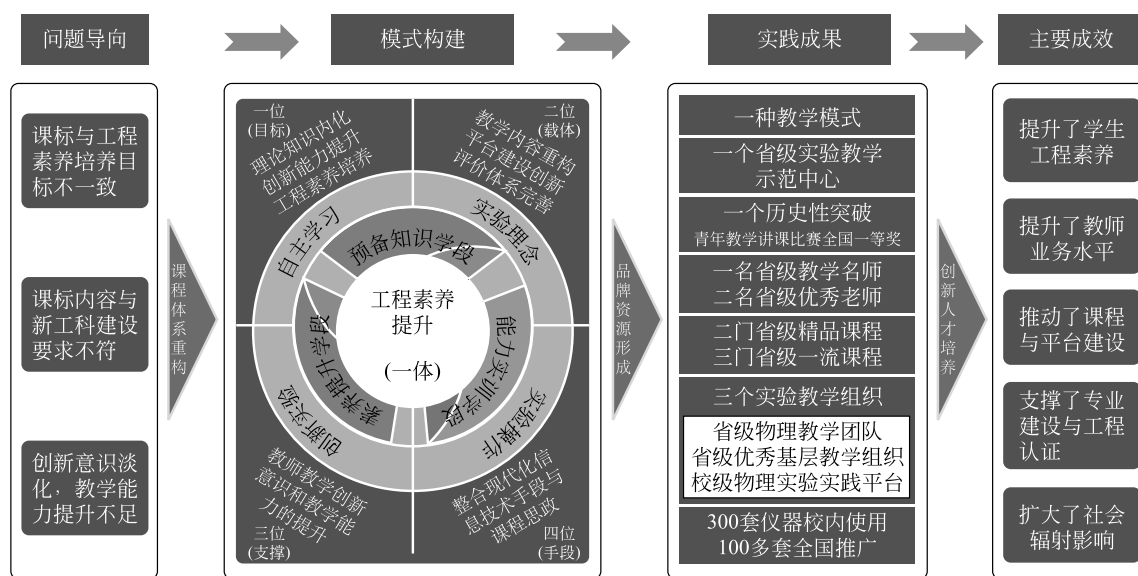


图1 《大学物理实验》“四位一体”课程改革与实践总体思路

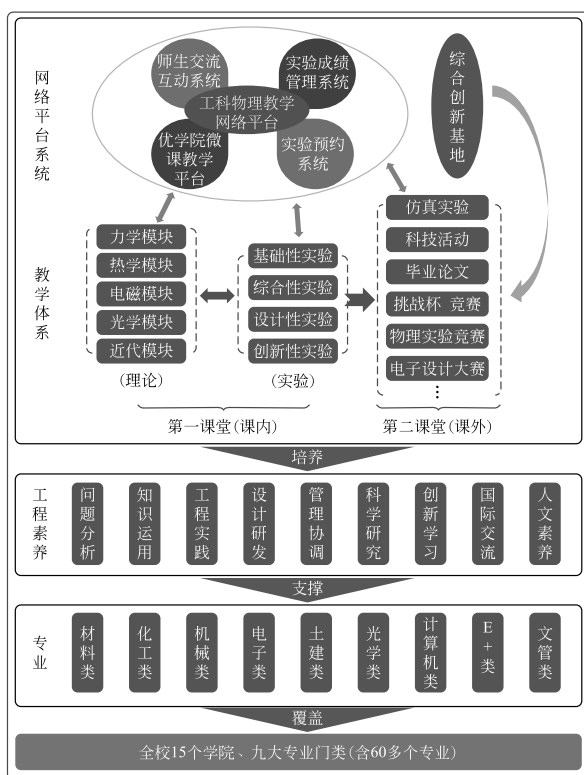


图2 课程支撑体系及师生互动平台示意图

2) 重构教学内容

省级物理教学团队由3个省级一流课程教学团队和省级物理教学示范中心(以下简称中心)组成。不断更新教学内容、加强教材建设。

教学团队精心制作实验“微课”视频,上线“优学院”平台,形成稳定丰富教学的课程资源。深挖

“课程思政”素材。融“思政”素材,如:物理学家的故事(含有爱国情怀、民族自豪感与自信心、拼搏与奉献精神、不贪图功名利禄)、物理定理和现象的发现(含有勇于创新、不畏权威、锲而不舍)、物理实验操作(含有诚实守信、团结协作、爱护公共财产与安全、维护实验室卫生、遵守实验室纪律、损坏仪器勇于担当的精神)、与教学有关的社会重大公共事件(如新冠病毒、波音737MAX停飞等)及科技前沿重大进展(或成果与战略)等于实验课程之中,深挖实验教学亮点与特色,拓展教学内容的广度和深度,加强实验课与生活、社会发展和科技进步的联系,调动学生内在潜力,实现社会主义核心价值观引领。

创建了双语实验室,增加双语实验。双语实验要求学生们课前完成全英文的实验预习报告,实验室的板书为全英文,还在教室放置一些与实验相关的全英文背景知识,主要实验仪器和部件的名称也用英文标注出来,营造英文实验环境。在实验课堂上老师用英文讲授实验的目的、原理、实验方法、取得实验数据的要求,仅在讲授关键词时用中文解释,加深对关键词的理解和记忆,英文讲授的比例可达到80%。物理实验的双语教学既能提高学生的实验兴趣,又能使学生提前接触专业外语,对学生有较好的激励作用,教学效果良好。拓展国际视野,增强双语教学软实力。

依托虚拟现实、多媒体、人机交互、数据库和网络通信等技术,增开仿真实验,打破时空限制,

丰富实验教学的内容、优化实验教学的形式,降低实验仪器损坏率。在《塞曼效应》实验中,通过实验前的虚拟实验,有效降低了实验难度,提高学生近代物理实验的兴趣。在《液体表面张力系数的测定》实验中,虚实结合让学生真切感受到一个实验的多种实现方式。利用原理实现方式的相似性,有效降低力敏传感器的损坏率。在基础、综合、设计与创新“四阶”基础上,分层次呈现仿真实验,引导学生实验学习兴趣,增强学生实验创新原动力。

利用计算机技术把实验设备、教学内容、教师指导和学生操作有机地融为一体,特别注意开发非理想化实验条件的实验项目,并利用计算机对结果深入分析研究,对比较复杂的数据处理借助计算机技术,以便更快找寻和分析误差产生原因。

3) 创新平台建设组建第二课堂

创新组建综合实验室,让其成为学生科技活动、完成毕业论文、物理实验竞赛、电子设计大赛、挑战杯竞赛等作品的场所,组建具有特色的第二课堂基地。通过征集项目,诚聘有经验教师,设计合理的实验内容的项目。利用中心已有的实验平台,如:光学实验平台(可组合 20 多个实验,可以自主设计对微位移、压力、温度等物理量进行测量),让学生对已开设的实验项目进行改进、独立探索,培养学生的研究、创新能力。

依托学院完整的学科体系和在光电、信息等方面的科研优势建立了自由设计和研究平台,充分实现院内资源整合,加强教学与科研的结合,扩大了创新性、研究型实验教学范围。

部分创新实验项目来自于其他学院(如:机械学院、电气学院以及工程实践中心等),实现校内资源充分整合。同时,还能够结合企业实际需求以及校内专业需求进行自研自制,并将创新成果产品化,延长了实验仪器的使用寿命又节约了办学成本,同时也加强了校企合作。

在教师指导下,以课外科技活动的方式在全天开放的创新实验室完成,学生提交研究报告、论文、专利等作为考核依据,全方位激发校内外学生的科研兴趣和实验学习的主动性。

4) 融合现代化信息技术

基于学校的网络资源、社交媒体平台(QQ 群和微信等)、学生手机和电脑等网络终端设备,建立大学物理实验教学网上平台,建设独具特色的

教学管理系统,构建“互联网+”环境下《大学物理实验》教课程师生交流互动平台系统(如图 2 所示),解决教师之间、学生之间和师生之间互动讨论不畅的问题。利用“优学院”平台,进行预备性知识与能力训练,强化基础通识教育,弥补高中生物理基础知识与实验技能不足。网络教学与实际教学混融,合理分配于教学过程中,实现课前有前测、课间诊断和课后思考与反馈。建设学生预约系统,实现学生“自由约课”和成绩信息化管理。利用社交媒体平台、移动终端等实现师生、生生及时互动、诊断、反馈、调节与激励,实施互动式教学。

5) 完善评价体系

树立“以平时考核为主,期末考试为辅”的评价理念,狠抓平时训练,注重实验过程。以平时考核为主、期末考试为辅,创建“平时+期末+创新”课程全过程覆盖的考核改革。

优化评价指标体系。课前要求预习,课堂签到+数据留存签字+现场评分,课后认真批改+重点纠错,课外加强兴趣培养;出勤率和实验报告保持传统做法;实验预习报告不要求机械抄写实验报告中实验原理,对较长较复杂的实验原理,要求学生在理解的基础上提取精华;增加线上“微课”视频观看及相关预备作业纳入成绩考核;在现场实验操作考核中,增加了学生完成实验的时间与独立实验的程度等考核指标,重视实验完成的独立性、速度、数据获取的准确性等的综合评定;“实验报告”部分的成绩采用传统考核方式计分。“实验预习+实验操作”+“实验报告”两部成绩以各占 50% 权重,得出一个实验项目的综合成绩。实验报告总结与小结部分,必须体现“课程思政”成绩,具体由老师根据实验情况决定。多个实验项目的平均成绩就是平时实验成绩。

强调实践性评价。将最后一次实验单独拿出来,老师不指导、不讲解,学生现场独立操作、数据处理,最后完成实验报告,全面考核学生综合实验能力。这作为实验现场考试。

强化创新能力评价。创新实验就是让学生对实验室所开设的实验进行改进,自主选择实验项目及实验仪器完成实验创新。创新实验成绩评价以小论文(含“课程思政”)的方式进行,可依据这一阶段的成果(如:论文、专利或竞赛成果等)。

实验成绩评价注重实用、可操作性。在不同

学习阶段,有所侧重。

第一阶段实验的第一学期:采用平时成绩(所做实验的平均)占70%,考试(为现场完成实验操作和数据处理)成绩占25%,实验创新报告占5%;

第一阶段实验的第二学期:采用平时成绩(所做实验的平均)占70%,考试(为现场完成实验操作和数据处理)成绩占20%,实验创新报告占10%;

激励性评价:对成绩较好且有追求的学生,可以开放近代物理实验室,让学生延伸知识层次,这一部分成绩以奖励的形式对学生进行评定,所得到的分数可以直接加入大学物理实验的总评成绩,这就是实验“拓展追加分”。

最终形成“实验预习(含线上预习)+实验报告”+“实验操作”+“现场实验考试”+“创新实验”+“课程思政”+“拓展追加分”等多样化成绩评价体系。

2.2 提升教师教学创新意识和能力

组建由学科专家领衔,理论课教师、实验教师、实验技术人员、企业兼职导师构成工程实践教学团队,坚持“老带新”教师培养模式;鼓励教师参加各类教学比赛,提升教师课堂教学创新意识。

加强“双师型”教学团队建设。鼓励教师指导学生参加学科竞赛,带领学生到企业进行专业认知实践;定期选派教师深入企业一线,参与产品研发;引入来自企业生产工作经验的高水平教师。提升教师课堂教学工程实践意识。鼓励教师海外开展科学研究,提升教师国际化视野。

2.3 分阶段组织教学,提升工程素养

采取师生一对一指导、挂图、思维导图、实验简介、同伴学习、线上(占35%学时)与线下(占65%学时)混融等方式组织教学(见图3)。

1) 预备知识学段

理论知识学习以线上+线下混合式为主开展理论知识强化。实验预习以线上教学为主。利用“微课”视频开展预备知识、基本实验技能等方面培训,拓宽学生知识面。先让学生查阅相关实验书籍,明确实验目的,看懂实验原理,确定实验内容、步骤及数据表格。学生间进行充分讨论,也可与教师沟通、也可提前去实验室现场了解,有效地解决学生实验前产生困惑与畏难情绪,让他们顺利地实验前测试和预习报告。

课堂教学以线下教学为主。课堂教学控制在10~20分钟,融入“思政”元素,培养学生的科学精神和家国情怀。

2) 能力实训学段

突出物理专业“三基”,即掌握基本理论,学好基础知识,掌握基本技能和方法,为良好的专业素养奠定基础。

实验操作以学生独立实验为主、老师现场指导为辅。这一阶段前30分钟,让学生自主操作、理解与内化,并进行现场检测,诊断学习成效。30分钟后,老师根据学生实验操作情况进行必要的指导。要淡化教师指导,以教材、仪器说明书及相关视频为主体,培养学生独立自主探究的能力。这一阶段要对学生实验完成独立性、速度和数据

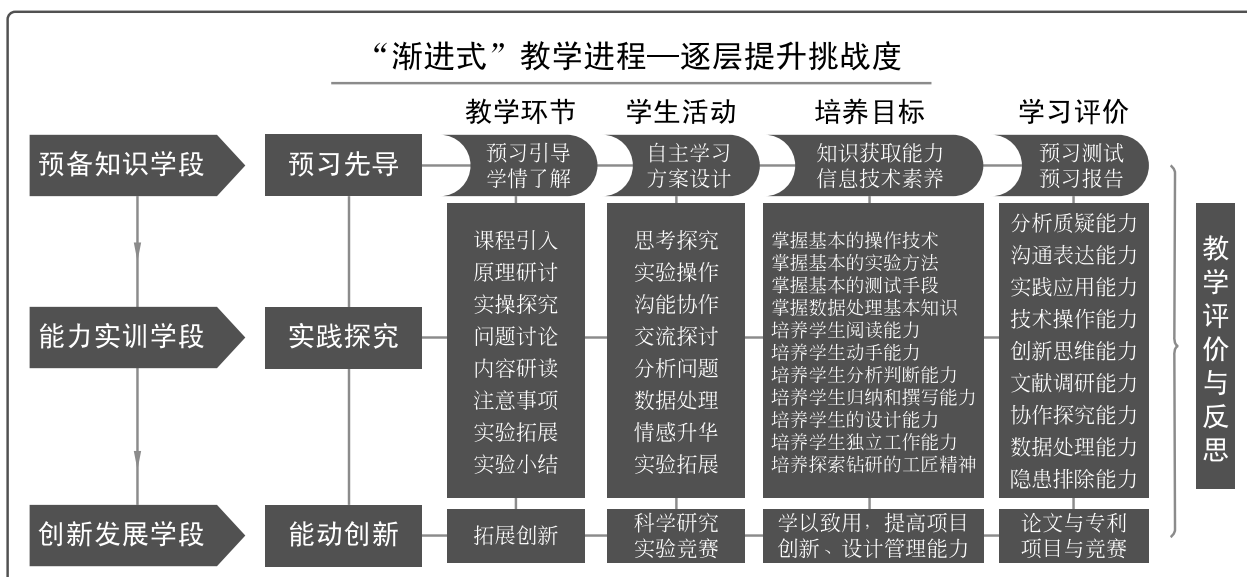


图3 分阶段教学、教学进程及能力培养指标

获取的正确性进行现场评价。现场评价以一个实验班(30 人左右)为考核单元,其中实验独立性占这部分成绩的约 30%,获取数据速度占约 20%,获取数据正确性占约 50%,这个比例由主讲教师决定。不同的实验,这些考核成绩的占比有所调整。

实验报告以学生独立为主。在大学物理实验报告完成过程中,特别要求实验报告的逻辑性与严密性,实验方案合理性、实验步骤可操作性,实验结果分析可靠性与可信性。并利用师生交流平台,及时答疑解惑,要求总结实验过程中的得与失。

3) 创新发展学段

创新实验主要采取一对一交流,学生利用创新平台进行毕业设计、科技实践及各种竞赛。以研究报告、论文、专利、竞赛成果等作为考核依据;通过现场答辩形式,考查学生工程创新能力,挑选具有工程素养较高且有兴趣的同学参与教师实验仪器开发团队,着重训练他们制作实验仪器、申报书撰写,团队分工协作及问题处理等方面的能力。如果开发产品成熟,向学校团委、创新创学院推荐,进入学校孵化大楼,培育相关的企业公司。实现全流程、分类地对学生工程能力进行培养,实现工程创新能力质的飞跃。

3 课程改革与实践的成果及推广应用

1) 人才工程素养提升显著

开展“线上”与“线下”一体化教学模式,学生的实验报告质量得到大幅度提高。近两年全校理工科大学物理实验成绩分布近似正态分布(见图 4)。春季成绩低于秋季成绩,这是由于春季是学生刚刚接触物理实验,还不熟悉实验规则和实验方法。近 90%的学生成绩分数集中于 70~89.9 分数段内,表明实验开设难易程度合适。高分段的学生占比逐年提高,表明实验课改的效果良好。春季平均成绩提高 3.7 分,秋季平均成绩提高 7.3 分(见表 1)。学生的评教成绩提高 6.5 分。每年网上选课人数不断增加,特别在新冠疫情期间发挥了重要作用。5 年来,获批“创新创业”训练计划项目国家级 6 项、省级 10 项,校长基金 28 项,竞赛奖获国家级 23 项、省级 35 项;专利申请 34 项,授权 14 项。对工程素养较高的学生,积极鼓励其与老师一起合作开发实验仪器。如果产品成熟,向学校团委、创新创学院推荐,让学生创新能力及工程素养获得极大地提高。

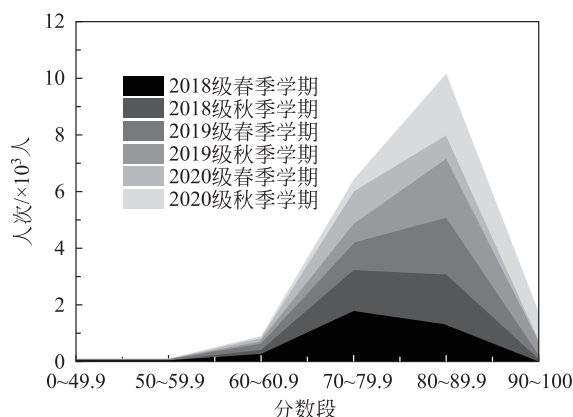


图 4 2018—2020 级学生成绩分数分布累计图

表 1 近 6 年学生平均成绩统计表

序号	年级	授课学期	学生人数	期末平均分	当学期是否开展在线教学
1	2015	2015—2016 春	3321	76.96	否
		2016—2017 秋		78.25	否
2	2016	2016—2017 春	3367	77.50	否
		2017—2018 秋		78.44	否
3	2017	2017—2018 春	3358	77.94	是
		2018—2019 秋		78.88	是
4	2018	2018—2019 春	3376	77.85	是
		2019—2020 秋		79.58	是
5	2019	2019—2020 春	3562	80.00	是
		2020—2021 秋		83.01	是
6	2020	2020—2021 春	3681	80.63	是
		2021—2022 秋		85.54	是

2) 提升了教师业务水平

中心教师获省、校级名师称号各 1 人, 省级优秀教师 2 人; 青年教师讲课比赛获得校一等奖 3 项, 省级优秀奖 1 项, 特别是青年教师讲课比赛取得全国一等奖的历史性突破; 获批省级教研项目 5 项, 校级 16 项; 获省级教学成果奖 2 项, 校级特等奖 1 项, 校级一等奖 3 项、二等奖 2 项、三等奖 1 项; 6 人获校“百佳导师”; 从国内外企业引入博士 2 名。

3) 推动了课程、平台与专业建设

制作 41 个微课, 特别在新冠疫情期间发挥了重要作用, 丰富课程资源; 主编教材 10 部, 2014 年出版的两本教材分别获得校优秀教材三等奖和二等奖; 《大学物理实验》和《大学物理》都成功获批省级一流课程和省级精品课程; 获批省级教学示范中心、省级物理教学团队、省级优秀基层教学组织、校先进基层党组织、先进集体和优秀实验室等称号。支撑全校 15 个学院、9 大类, 60 个专业的建设, 其中, 一流本科专业立项建设国家级 7 个、省级 9 个; 通过工程教育专业认证 4 个。

4) 扩大了社会影响

学生评教成绩提高显著, 如 2020 年春季相对于 2018 年春季提高了 6.5 分。学生在评教系统里说: “老师授课的方式非常适合我们”。本课程教学体系改革得到校内督导专家、校外同行专家的高度评价。中心接待来自武汉大学、湖北汽车工业学院等单位参观学习。中心承办了省级实验年会, 在全国性大会上进行了成果交流, 得到与会人员的好评。研发 300 多套创新仪器用于本校实验教学。其中, 与光驰科技有限公司联合开发的“静电场描绘实验仪”已在全国推广 100 套。产生了很好的经济效益和社会效益。所编教材发行量超 14 万册, 全国 20 多个省市自治区的高校图书馆收藏, 并向海外推介。

4 结语

课程团队响应中国制造 2025 等国家战略, 针对当前大学物理实验教学痛点, 依据各专业的特点与需求, 充分整合校内资源, 构建互联网环境下基础物理课程体系及师生交流互动平台; 深挖“思政”, 加强企业合作, 创新实验平台建设; 在分块、分类、分阶的基础上, 以“学科交叉、学创融合、学段贯通、国际视野”作为切入点, 开展“课内+课外”“课堂+现场”“线上+线下”“平时+期末”的

课程改革, 打造了一支“理论-实践-工程”融合的师资队伍, 构成“理论课堂-实验实践-大赛创新”协同育人模式, 夯实学校一流专业建设和工程教育专业认证的基石。由于学情在不断动态变化, 《大学物理实验》课程建设与探索仍需课程团队持续努力。课程已取得的成果供兄弟院校新工科专业《大学物理实验》课程建设参考。

参 考 文 献

- [1] 赵薪. 在新工科背景下, 构建以学习者为中心提高航海应用型人才的工程素养研究[J]. 天津航海, 2021, (3): 74-79.
ZHAO X. Construct a learner-centered research on improving the engineering literacy of Marine applied talents under the background of emerging engineering[J]. Tianjin Hanhai, 2021, (3): 74-79. (in Chinese)
- [2] 林健. 面向未来的中国新工科建设[J]. 清华大学教育研究, 2017, 38(2): 26-35.
LIN J. The construction of China's new engineering disciplines for the future[J]. Tsinghua Journal of Education, 2017, 38(2): 26-35. (in Chinese)
- [3] 林健. 引领高等教育改革的新工科建设[J]. 中国高等教育, 2017(Z2): 40-43.
LIN J. Leading the emerging engineering construction of higher education reform[J]. China Higher Education, 2017(Z2): 40-43. (in Chinese)
- [4] 中华人民共和国教育部. “六卓越一拔尖”计划 2.0[EB/OL]. (2019-04), [2022-06]. http://www.moe.gov.cn/jyb_xwfb/gzdt_gzdt/moe_1485/201904/t20190429_380009.html.
- [5] 樊英杰. 以工程思维能力培养为导向的大学物理实验教学改革创新[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(4): 171-175.
FAN Y J. Reform and innovation of college physics experiment teaching based on cultivation of engineering thinking ability[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2021, 40(4): 171-175. (in Chinese)
- [6] 罗艳伟, 王俊涛. 以学生为中心的立体化物理实验课程教学改革探索[J]. 物理通报, 2022(5): 6-9.
LUO Y W, WANG J T. Exploration on student-centered progressing teaching reform of three-dimensional physics experiment course[J]. Physics Bulletin, 2022(5): 6-9. (in Chinese)
- [7] 秦成兵, 王申, 李鹏, 等. 地方高校科教融合协同育人模式的改革与实践——以山西大学物理学科为例[J]. 高等理科教育, 2022(4): 1-7.
QIN C B, WANG S, LI P, et al. The reform and practice of collaborative education mode of research and teaching in local universities—taking the physical discipline at Shanxi university as an example[J]. Higher Education of Sciences, 2022(4): 1-7. (in Chinese)
- [8] 李莉, 裴艺丽, 张师平, 等. 新工科大学物理实验课程教学调研与改革实践[J]. 物理与工程, 2021, 31(6): 174-182.
LI L, PEI Y L, ZHANG S P, et al. Research and practice in college physics experiment teaching reform for emerging

- engineering education[J]. Physics and Engineering, 2021, 31(6):174-182. (in Chinese)
- [9] 孙腊珍, 张增明. 以培养学生能力为核心, 建立多层次实验课程体系和多元化教学模式[J]. 实验技术与管理, 2012, 29(4):1-2+16.
- SUN L Z, ZHANG Z M. Taking cultivating students' ability as kernel to set up multilevel experiment course system and teaching mode[J]. Experimental Technology and Management, 2012, 29(4): 1-2+16. (in Chinese)
- [10] 倪涌舟, 周国泉, 徐一清, 等. 基于 MOOCs 的大学物理实验教学改革的实践——以浙江农林大学为例[J]. 科教导刊, 2021, 07: 40-42.
- NI Y Z, ZHOU G Q, XU Y Q, et al. Reform and practice of college physics experiment teaching based on MOOCs—take Zhejiang A&F university as an example[J]. The Guide of Science & Education, 2021, 07: 40-42. (in Chinese)
- [11] 周晓红, 陈杰, 张西平, 等. 基于创新创业教育理念的大学物理实验课程改革探索与实践[J]. 大学教育, 2021, 01: 148-150.
- ZHOU X H, CHEN J, ZHANG X P, et al. Exploration and practice of college physics experiment curriculum reform based on the idea of innovation and entrepreneurship education[J]. University Education, 2021, 01: 148-150. (in Chinese)
- [12] 胡雪兰, 张艳峰, 杨新涅, 等. 面向工程能力培养的大学物理教学模式创新[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(6):10-14.
- HU X L, ZHANG Y F, YANG X S, et al. Innovation of college physics teaching model for engineering ability training[J]. Experimental Technology and Management, 2020, 37(6):10-14. (in Chinese)
- [13] 戴玉蓉, 朱延技, 陈小喜, 等. 实验类在线开放课程建设探索与实践——以东南大学预备性物理实验课程为例[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(8):177-180.
- DAI Y R, ZHU Y J, CHEN X X, et al. Construction of online open experimental course—a case study of “preliminary physics experiment” in Southeast university[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2021, 40(8): 177-180. (in Chinese)
- [14] 孙存英, 王宇兴, 王锦辉, 等. 大学物理实验课堂教学探索[J]. 实验室研究与探索, 2020, 9(8): 189-191.
- SUN C Y, WANG Y X, WANG J H, et al. Exploration on classroom teaching of college physics experiment[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2020, 9(8): 189-191. (in Chinese)
- [15] 秦平力, 余雪里, 张昱. “互联网+”背景下大学物理实验教学创新与探索[J]. 物理通报, 2019(9):100-103,109.
- QIN P L, YU X L, ZHANG Y. Innovation and exploration on university physics experiment teaching under the background of Internet+[J]. Physics Bulletin, 2019(9): 100-103, 109. (in Chinese)

(上接第 72 页)

- [7] 杜祥琬. 非线性中子输运问题的一个解法[J]. 计算物理, 1984, 1(2): 226-236.
- DU X W. A method for solving the nonlinear neutron transport question[J]. Journal of Computational Physics Sinica, 1984, 1(2): 226-236. (in Chinese)
- [8] 吕敏. 最善于指导实验工作的理论家[J]. 物理, 2006, 35(9): 758-759.
- LV M. Theoretical physicist who is best at guiding experiments[J]. Physics, 2006, 35(9): 758-759. (in Chinese)
- [9] BERNI A. Methods in Computational Physics[M]. New York: Academic Press, 1963.
- [10] JONES M, AMPLEFORD D, CUNEO M, et al. X-ray power and yield measurements at the refurbished Z machine[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85: 083501.
- [11] SANFORD T, NASH T, OLSON R, et al. Progress in Z-pinch driven dynamic-hohlraums for high-temperature radiation-flow and ICF experiments at Sandia National Laboratories[J]. Plasma Physics of Controlled Fusion, 2004, 46: B423-B433.
- [12] 黄显宾, 任晓东, 但加坤, 等. 基于聚龙一号的钨丝阵 Z 箍缩内爆辐射特性[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(2): 025006.
- HUANG X B, REN X D, DAN J K, et al. Characteristics of tungsten wire array Z-pinch implosion radiation on PTS[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(2): 025006. (in Chinese)
- [13] 王淦昌. 王淦昌全集 第 3 卷-学术论文(二)[M]. 石家庄: 河北教育出版社, 2004.
- [14] 王淦昌. 王淦昌全集 第 4 卷-惯性约束核聚变[M]. 石家庄: 河北教育出版社, 2004.
- [15] 王淦昌. 王淦昌全集 第 5 卷-无尽的追问论述文章[M]. 石家庄: 河北教育出版社, 2004.
- [16] 郑万国, 王成程. 神光-III 激光装置项目管理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [17] ZYLSTRA B, HURRICANE O A, CALLAHAN D A, et al. Burning plasma achieved in inertial fusion[J]. Nature, 2022, 601: 542-548.
- [18] Indirect Drive ICF Collaboration. Lawson Criterion for Ignition Exceeded in an Inertial Fusion Experiment[J]. Physical Review Letters, 2022, 129: 075001.
- [19] 张钧, 常铁强. 激光核聚变靶物理基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.